第44卷第3期
2004年5月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol 44, No 3
May 2004

文章编号: 1000-8608(2004)03-0362-04

用于激波控制反应器的原料气加速特性研究

俞鸿儒*, 单希壮

(中国科学院力学研究所 高温气体动力学重点实验室, 北京 100080)

摘 要: 为观察超声速混合过程, 设计制造了专用的实验装置 实验结果表明: 混合过程的总压损失随两种超声速流的密度比、静温比增大而增加 若密度比、静温比相同或相近时, 速度差对总压损失的影响可忽略 但速度差随密度比、静温比增大而增大时总压损失亦随之增大

关键词: 裂解; 乙烯; 超声速混合

中图分类号: TQ 054.4 **文献标识码**: A

0 引 言

裂解制造乙烯生产实践经验和化学动力学计算[1,2]均表明: 缩短裂解反应(停留)时间以及升高裂解反应温度是提高乙烯产率的有效手段 激波加热具有快速升温的特性, 为缩短并精确控制停留时间提供了必要条件, 同时激波加热易于达到高的裂解反应温度, 因而激波控制加热方法用于裂解制造乙烯可大幅度提高乙烯产率, 降低乙烯生产成本

要实现激波控制加热方法, 首先应使原料气的温度在激波加热以前始终保持低于裂解反应明显出现的温度(临界温度), 以避免出现明显的裂解反应 其次, 由于激波加热是一种介质内部能量的转换过程, 高速气流穿过激波阵面后, 一部分动能转化为热能, 使介质瞬时升温 为使原料气的温度增加到裂解反应要求的水平, 原料气在激波加热以前应达到所需的高速度 常规的膨胀加速气体的方法由于气源温度高于激波后气体温度, 不能用于激波控制加热过程

Mattick 等[3]提出利用高温水蒸气做载气, 将载气膨胀加速至超声速, 然后与原料气流在超声速条件下混合, 在混合过程中将能量传递给原料气 这种利用载气超声速混合提高原料气总焓的设想符合激波控制加热的基本要求 然而实验结果[4]表明: 只有在高的载气与原料气质量流率比时(载气 > 96%), 才能获得高的乙烯产率 由于载气耗量过高, 生产成本昂贵, 缺乏实用价值 如弄清超声速混合的优化条件, 上述缺点有可能解决 本文为此开展有关的实验探索研究

1 实验装置

超声速混合实验中, 载气和原料气两种气流的流速都比较高 为了降低实验段壁面对混合现象的干扰效应, 实验设备的横截面尺寸不能太小 因此, 气流流量比较大 若采用高温水蒸气做载气, 并采用真实原料气, 则耗用的气体费用和加热费用将比较多 为了节省实验费用, 以及考虑实验的主要目的, 选用室温空气代替高温水蒸气做载气和原料气, 并专门研制了一套超声速混合装置(如图 1 所示).

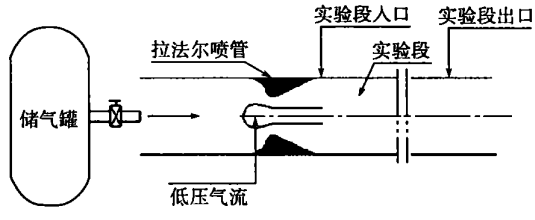


图 1 超声速混合模拟装置示意图

Fig. 1 Schematic graph of the setup for supersonic mixing

收稿日期: 2003-02-30; 修回日期: 2004-04-22
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19632002).
作者简介: 俞鸿儒* (1928-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 大连理工大学机械系 1953 届毕业生; 单希壮(1961-), 男, 博士生

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实验装置主要由 2 种超声速气流发生器组合而成. 由 2 套可提供不同压力的气源、2 套快速阀及恒压阀、气流稳定段、喷管加速段、混合实验段和出口段组成. 来自高压储气罐和低压储气罐的气流经组合拉法尔喷管产生 2 种速度不同的超声速气流平行地流入实验段.

考虑到 2 种超声速气流的马赫数可按要求变化组合, 拉法尔喷管被设计为易于更换的二维相嵌组合式喷管. 共设计加工了 4 个外喷管, 可分别产生 $Ma = 1.5$、2.0、2.5、3.0 的超声速气流. 设计加工了 4 个内喷管, 可分别产生 $Ma = 1.0$、1.5、2.0、2.5 的气流. 通过内外喷管的不同组合, 可以实现多种超声速流混合状态.

组合拉法尔喷管产生 3 股超声速气流, 2 个混合剪切面. 其中上下 2 股气流为较高速的超声速气流, 而中心为较低速度气流. 实验段入口处速度分布如图 2 所示.

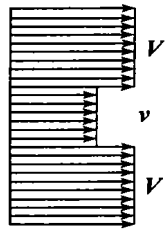


图 2　实验段入口截面气流速度示意图

Fig. 2　Velocity distribution at inlet of test section

本实验中使用的测量手段为纹影观察和总压测量. 为了便于光学观察, 实验段的横截面设计为矩形: 高 80 mm、宽 50 mm. 为了减弱壁面边界层的影响, 将上下 2 股气流设计得较宽.

前面已经指出, 要实现激波控制加热, 原料气在受可控激波加热以前, 其温度应始终低于临界温度. 因此, 在超声速混合过程中, 要避免出现强激波等非等熵现象, 以防止原料气被意外加热, 使其温度超过临界温度. 超声速气流被压缩时将出现激波, 偏转角愈大, 激波强度亦愈强. 超声速混合过程中, 不管哪一股气流受到压缩产生激波, 经壁面反射后都将波及 2 种气流. 如果 2 种超声速气流的静压不相等, 则静压低的超声速气流将被压缩偏转产生激波. 为防止混合过程中出现激波, 应使 2 种超声速气流的静压相等, 至少应相近. 因此, 2 种超声速气流的马赫数不相同时, 所需气源的总压亦随之改变, 马赫数愈高, 要求气源总压亦愈高. 本实验中 2 种超声速气流的马赫数差为 0.5、1.0 和 1.5. 实验状态如表 1 所示.

2　实验结果

实验中首先通过光学方法检测每个截面上是否存在较强的激波, 在确认流场内无较强激波后, 利用尖劈组定性判断截面上马赫数的均匀程度, 然后测量不同截面上的总压分布.

表 1　实验状态

Tab. 1　Test cases

$Ma_h + Ma_l$	p_∞/MPa	u_h/(m·s^{-1})	u_l/(m·s^{-1})	p_{h0}/MPa	p_{l0}/MPa
1.5 + 1.0	0.053	424.8	311.1	0.20	0.10
2.0 + 1.0	0.053	508.3	311.1	0.42	0.10
2.0 + 1.5	0.027	508.3	424.8	0.22	0.10
2.5 + 2.0	0.019	568.3	508.3	0.38	0.15
2.5 + 1.0	0.019	568.3	311.1	0.73	0.08
3.0 + 2.0	0.019	610.9	508.3	0.70	0.15
3.0 + 2.5	0.018	610.9	568.3	0.70	0.30
2.5 + 1.5	0.027	568.3	424.8	0.47	0.10

2.1　流场显示结果

通过放置在流场内的一个尖劈组所产生的弓形激波在截面上的均匀情况可以得知截面上马赫数的分布情况. 图 3 为 $Ma_h = 2.5$、$Ma_l = 1.0$ 时距实验段入口 2、6、10 倍入口高度截面处流场内放置尖劈组时纹影照片. 从中可以看出, 在距实验段入口 10 倍入口高度截面上的激波基本均匀.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

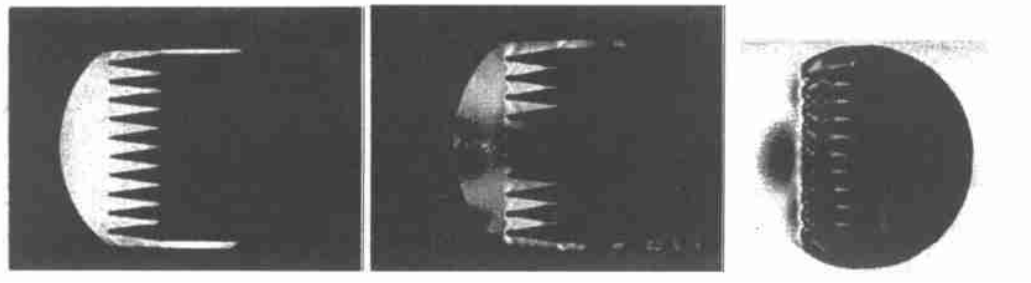
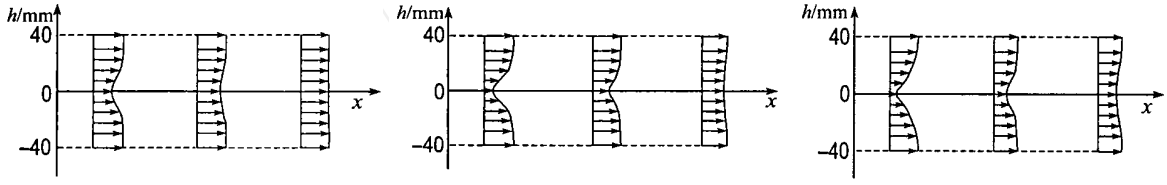


图3 $Ma_h = 2.5$、$Ma_l = 1.0$ 纹影照片

Fig. 3 Schlieren pictures ($Ma_h = 2.5$, $Ma_l = 1.0$)

2.2 总压测量结果

由于由总压测量结果能推算出气流的速度,总压测量是本项工作的基本测量手段. 本实验中在距实验段入口2、6、10倍入口高度截面处进行了静压、总压的测量. 图4给出了3个典型实验状态下沿流向3个不同位置处的总压测量结果.



(a) $Ma_h = 1.5$、$Ma_l = 1.0$ (b) $Ma_h = 2.5$、$Ma_l = 1.5$ (c) $Ma_h = 2.5$、$Ma_l = 1.0$

图4 总压分布

Fig. 4 Distribution of total pressure

2.3 总压损失

为了对混合过程产生的总压损失进行评估,本文提出一种理想混合过程作为参照基准. 定义理想混合时,2种气流之间动能交换为等熵过程,因此当两者混合均匀时

$$\frac{1}{2}\dot{m}_h u_h^2 + \frac{1}{2}\dot{m}_l u_l^2 = \frac{1}{2}(\dot{m}_h + \dot{m}_l)\bar{u}^2 \quad (1)$$

$$\dot{m}_h c_p(\bar{T} - T_h) = \dot{m}_l c_p(T_l - \bar{T}) \quad (2)$$

由式(1)、(2)得出

$$\bar{T} = (\dot{m}_h T_h + \dot{m}_l T_l)/(\dot{m}_h + \dot{m}_l) \quad (3)$$

$$\bar{u} = \sqrt{(\dot{m}_h u_h^2 + \dot{m}_l u_l^2)/(\dot{m}_h + \dot{m}_l)} \quad (4)$$

当地声速 $\bar{a} = \sqrt{\gamma R\bar{T}}$.

理想混合后的气流平均马赫数

$$\overline{Ma} = \bar{u}/\bar{a} = \sqrt{(\dot{m}_h u_h^2 + \dot{m}_l u_l^2)/\gamma R(\dot{m}_h T_h + \dot{m}_l T_l)} \quad (5)$$

由等熵关系可求得理想混合后的气流平均总压

$$\bar{p}_0 = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}\overline{Ma}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}\bar{p} \quad (6)$$

毕托靶测出的总压为波后总压,可根据 $\overline{Ma}$ 值求出理想混合的毕托压力

$$\bar{p}_{0t}' = \frac{\left(\frac{\gamma+1}{2}\overline{Ma}^2 \Big/ \left(1 + \frac{\gamma-1}{2}\overline{Ma}^2\right)\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\overline{Ma}^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}}\bar{p}_0 \quad (7)$$

求出 $\bar{p}_{0t}'$ 与实测的毕托压力 $\bar{p}_0'$ 相比较,可作为估算混合过程总压损失的参考值.

实际测量中还包含了管壁摩擦损失,实际混合后的马赫数与理想混合过程气流马赫数存在小的差别. 因此,以 $\bar{p}_{0t}'$ 为参考值与测量值 $\bar{p}_{0c}'$ 作比较时,两者并不完全相当,但能反映混合加速特性的实质.

表2给出距离10倍入口高度截面处的总压比.

由表2看出总压损失随2种气流的密度比、静温比的增大而增大. 特别值得注意的是,当2种气流密度比、静温比相同或相近时,速度差变化对总压损失没有影响. 速度差对总压损失的影响淹没在测量误差中. 而当速度差伴随着密度比、静温比的增大而增大时,总压损失亦随之增大.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　各种实验状态的总压比 $\bar{p}'_{0c}/\bar{p}'_{0t}$

Tab. 2　The total pressure ratio $\bar{p}'_{0c}/\bar{p}'_{0t}$ at different experimental cases

Ma_h/Ma_l	$Ma_h - Ma_l$	$(u_h - u_l)/(m \cdot s^{-1})$	ρ_h/ρ_l, T_h/T_l	$\bar{p}'_{0c}/\bar{p}'_{0t}$
3.0/2.5	0.5	42	1.244	0.88
2.5/2.0	0.5	60	1.256	0.88
2.0/1.5	0.5	84	1.241	0.89
3.0/2.0	1.0	102	1.555	0.73
2.5/1.5	1.0	144	1.552	0.76
2.0/1.0	1.0	197	1.500	0.75
2.5/1.0	1.5	255	1.875	0.65

3　结果讨论与结论

激波控制加热方法要求利用载气流的动能, 通过超声速流动混合将原料气流速度提高到所需的相当高的水平, 是极其困难的问题. 如果混合过程中总压损失太大, 必将造成载气耗量过大.

本实验得出, 总压损失在一定范围内只与密度比、静温比有关, 因此在载气流与原料气流参数选择时, 尽量使两种气流的密度比、静温比接近, 则总压损失可大大降低. 同时在保持低总压损失的条件下尽量扩大速度差, 因而可有效提高原料气速度.

本实验尚存在不足之处: (1) 受实验方案采用室温空气作为载气和原料气所限, 2 种气流的密度比与静温比的变化是相同的, 因此无法区别密度比与静温比对总压损失的影响. (2) 当密度比、静温比相同时, 两种气流的速度差对总压损失没有什么影响, 但当速度差随着密度比、静温比增大而增大时, 总压损失亦随着增大. 这种总压损失增大究竟是受密度比、静温比的影响, 还是受密度比、静温比和速度差三者共同影响, 尚需进一步研究才能彻底弄清.

参考文献:

[1] 俞鸿儒. 适用于裂解制造乙烯的气体动力学加热方法[J]. 大连理工大学学报, 2002, **42**(3): 253-260. (YU Hong-ru. Gasdynamic heating process suitable for manufacturing ethene by pyrolysis [J]. **J Dalian Univ Technol**, 2002, **42**(3): 253-260.)

[2] 邹仁钧. 石油化工裂解原理和技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1983.

[3] MATTICK A T, HERTZBERG A, RUSSELL D A. Shock controlled reactors [A]. **Shockwaves** [M]. TAKAYAMA K. New York: Springer-Verlag, 1992. 1289-1294.

[4] MATTICK A T. Pyrolysis of hydrocarbons using a shockwave reactor [A]. **Proceedings of 21st International Symposium on Shock Waves** [C]. Australia: [s n], 1997.

Research on acceleration behavior of gaseous feedstock for a shock controlled reactor

YU Hong-ru*, SHAN Xi-zhuang

(LHD, Inst. of Mech., CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: The special experimental setup was constructed for observing the mixing processes of two supersonic flow. The experimental results show that the higher the static temperature and the density ratio between two supersonic flow, the more the total pressure losses of flow during mixing. The effect of the velocity difference on total pressure loss may be neglected, if the density and the static temperature difference are equal. But total pressure loss increases with the increasing of the velocity difference accompanied with the increase of the density and the static temperature ratio.

Key words: pyrolysis; ethene; supersonic mixing

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net